

**ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENERACIÓN
DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENERACIÓN
DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: ESTIVEN ISRAEL QUITO FLORES
TUTOR: CARLOS ANDRÉS BARRERA
SINGAÑA

Quito -Ecuador
2022

Estiven Israel Quito Flores

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Estiven Israel Quito Flores (Y'1998). Realizó sus estudios de nivel secundario en la Unidad Educativa Fernández Salvador Villavicencio Ponce de la ciudad de Quito. Se encuentra cursando el décimo nivel de la carrera de Ingeniería en Electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la óptima ubicación y dimensionamiento de generación distribuida aplicando un algoritmo de polinización de flores. equitof1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Carlos Andrés Barrera Singaña (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. cbarrera@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2022 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO – ECUADOR

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

Yo, Estiven Israel Quito Flores con documento de identificación N° 1726163916 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 04 de mayo del año 2022

Atentamente,



Estiven Israel Quito Flores
1726163916

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Estiven Israel Quito Flores con documento de identificación No. 1726163916, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Óptima ubicación y dimensionamiento de generación distribuida usando el algoritmo de polinización de flores”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 de mayo del año 2022

Atentamente,



Estiven Israel Quito Flores

1726163916

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña con documento de identificación N° 0503503336, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES**, realizado por Estiven Israel Quito Flores con documento de identificación N° 1726163916, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 de mayo del año 2022

Atentamente,



Ing. Carlos Andrés Barrera Singaña, MSc
0503503336

1. ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Abstract.....	1
1 Introducción	2
2 Marco Teórico	4
2.1 Sistemas Eléctricos de Distribución	4
2.1.1 Sistema radial.....	4
2.1.2 Sistema de anillo.....	4
2.1.3 Sistema mallado	5
2.2 Energías renovables aplicadas en Generación Distribuida	5
2.2.1 Generación fotovoltaica	5
2.3 Preparación de Sistemas de Distribución para Aplicación de Generación Distribuida	6
2.4 Generación distribuida en sistemas eléctricos de distribución	7
2.4.1 Generación distribuida mediante paneles fotovoltaicos	7
2.5 Perfiles de voltaje	7
2.5.1 Límites de voltaje permitidos en sistemas de distribución	8
2.6 Pérdidas de energía en los sistemas de distribución	8
2.7 Índices de confiabilidad en sistemas de distribución.....	9
3 Algoritmo de Polinización de Flores.....	10
4 Ubicación y dimensionamiento	11
5 Implementación del modelo matemático	12
6 Caso de estudio.....	13
7 Análisis de Resultados	14
7.1 Perfiles de voltaje	14
7.2 Pérdidas de potencia	15
7.3 Índices de confiabilidad	15
6. Conclusiones.....	17
7. Trabajos Futuros.....	17
8. Referencias.....	17
8.1 Matriz de Estado de Arte.....	21
8.2 Resumen de Indicadores	26

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Generación distribuida en Sistemas Eléctricos de Distribución.	3
Figura 2: Sistema de distribución radial.	4
Figura 3: Sistema de distribución en anillo.	5
Figura 4: Sistema de distribución radial.	5
Figura 5. Diagrama de bloques para determinar la ubicación y capacidad de GD usando APF.	12
Figura 6. Diagrama unifilar del Modelo IEEE de 34 barras.	13
Figura 7. Diagrama unifilar del Modelo IEEE de 34 con óptima ubicación de GD.	14
Figura 8. Perfiles de voltaje antes de aplicar GD.	14
Figura 9. Perfiles de voltaje después de aplicar GD.	14
Figura 10. Comparación de perfiles de voltaje antes y después de aplicar GD.	15
Figura 11. Comparación de pérdidas de potencia antes y después de aplicar GD.	15
Figura 12. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	26
Figura 13. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.	26
Figura 14. Indicador de solución - Estado del arte.	27

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologías aplicadas en GD.	5
Tabla 2. Ventajas y desventajas de aplicar GD en sistemas eléctricos de potencia.	6
Tabla 3. Límites para índices de voltaje.	8
Tabla 4. Pseudocódigo del algoritmo propuesto.....	12
Tabla 5. Datos de las líneas.	13
Tabla 6. Datos de las cargas.	13
Tabla 7. Comparación de perfiles de voltaje antes y después de aplicar GD.	15
Tabla 8. Unidades de medida de los índices de confiabilidad.	16
Tabla 9. Índices de confiabilidad del sistema sin GD.....	16
Tabla 10. Índices de confiabilidad del sistema con GD.	16
Tabla 11. Índices de confiabilidad del sistema antes y después de aplicar GD.....	16
Tabla 12. Matriz de estado del arte.....	21

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES

Resumen

La aplicación de Generación Distribuida (GD) en los sistemas de distribución tiene como objetivo principal reducir las pérdidas de energía y aumentar el perfil de voltaje con el fin de hacer más confiable al sistema y brindar un óptimo servicio a los consumidores. Existe una gran variedad de energías renovables no convencionales, pero para este caso se ha optado por utilizar GD fotovoltaica. Las características propias de la generación fotovoltaica provocan subidas y bajadas en la energía producida. Si la energía que se genera es mayor que la consumida se producirá una bidireccionalidad en el flujo de energía. Es por ese motivo que tanto la ubicación como el dimensionamiento de la GD deben ser óptimos y así evitar que la penetración de generación fotovoltaica produzca cambios negativos en los flujos de potencia y perfiles de voltaje.

En este trabajo se propone la utilización del Algoritmo de Polinización de Flores (APF) aplicado en el software Matlab para encontrar la óptima ubicación y dimensionamiento de la GD en el Sistema IEEE de 34 barras, con el objetivo de reducir las pérdidas del sistema y elevar los perfiles de voltaje.

Posteriormente con la ayuda del software DIgSILENT Power Factory se analizan los índices de confiabilidad en el sistema con los resultados obtenidos de la optimización.

Palabras Clave: Generación distribuida, Sistema de Distribución, Algoritmo de Polinización de Flores, Perfiles de Voltaje, Flujos de Potencia.

Abstract

The application of Distributed Generation (DG) in distribution systems has the main objective of reducing energy losses and increasing the voltage profile to make the system more reliable and provide optimal service to consumers. There is a great variety of non-conventional renewable energies, but for this case it has been chosen to use photovoltaic DG. The characteristics of photovoltaic generation cause rises and falls in the energy produced. If the energy that is generated is greater than that consumed, there will be a bidirectionality in the energy flow. It is for this reason that both the location and the dimensioning of the DG must be optimal and thus avoid that the penetration of photovoltaic generation produces negative changes in the power flows and voltage profiles.

In this article, the use of the Flower Pollination Algorithm (APF) applied in the Matlab software is proposed to find the optimal location and dimensioning of the DG in an IEEE System of 34 buses, with the aim of reducing system losses and increasing the voltage profiles.

Later, with the help of DIgSILENT Power Factory software, the reliability indices in the system will be analyzed with the results obtained from the optimization.

Keywords: Distributed Generation, Distribution System, Flower Pollination Algorithm, Voltage Profiles, Power Flows.

1 Introducción

Hoy en día el crecimiento poblacional y el desarrollo de dispositivos eléctricos para uso cotidiano han sido una de las principales causas para el aumento de la demanda eléctrica a nivel mundial. Por este motivo, la humanidad se ha visto obligada a desarrollar nuevas fuentes de generación eléctrica que permitan solventar dicha demanda y a la vez sean ilimitadas y amigables con el medio ambiente [1].

Debido a que las comunes fuentes de energía como agua, petróleo y gas necesitan de un terreno bastante amplio para su operación, así como también equipos y maquinaria, se ha optado por aprovechar otra fuente de energía renovable, que sea de fácil acceso para el usuario, económica y que a la vez no sea un problema para el funcionamiento normal del sistema de distribución, sino que, al contrario, sirva como ayuda restándole cargabilidad al mismo, estas fuentes de energía son conocidas como generación distribuida.

Las unidades de generación son de pequeña y mediana capacidad, varían entre los 5 a 10 kW y se conectan paralelamente al sistema o las cargas. Las tecnologías que se manejan en este tipo de generación pueden ser turbinas de viento, biomasa, celdas de combustible, microturbinas y celdas o paneles fotovoltaicos. De entre estas opciones las más usadas son las celdas fotovoltaicas debido a su variedad, eficiencia y funcionalidad [2].

Aparte de ser amigable con el medio ambiente, la generación distribuida representa beneficios de ahorro económico muy importantes. Empezando desde los costos de implementación, la instalación de una unidad de generación distribuida es mucho menos costosa que la de una unidad de generación cotidiana como las existentes en centrales hidroeléctricas. Esto debido a que se agregan los costos de las distancias

que deben recorrer para conectar dichas fuentes con los puntos de abastecimiento y los usuarios finales, por ende, se suman también los costos de construcción de infraestructura (líneas de transmisión, centrales de transformación, etc.).

Estos son los resultados que se obtienen cuando se compara generación distribuida con generación cotidiana, aparte se le puede sumar los beneficios que se generan en el área de transmisión al eliminar el costo por peaje de transmisión, debido a que las fuentes de generación distribuida se encuentran situadas en el mismo punto de la carga, esto permite reducir la cargabilidad en las líneas de transmisión, reduciendo así las pérdidas en el sistema de distribución y elevando los perfiles de voltaje [3].

Debido a los beneficios mencionados anteriormente y a la presión de los actuales problemas ambientales, el mercado eléctrico a nivel mundial está obligando a las empresas distribuidoras de energía y servicios públicos a pasar de generación de energía eléctrica tradicional a la generación de energía eléctrica distribuida [4], apuntando a una repotenciación, expansión y mejoramiento de la estructura del sistema de distribución con el objetivo de llegar a ser una red inteligente que trabaje conjuntamente con las unidades de generación distribuida.

Uno de los factores más importantes al momento de aplicar generación distribuida es el estudio para su ubicación y dimensionamiento. Colocar y dimensionar de manera errónea las unidades de generación podría ocasionar graves problemas relacionados con pérdidas de energía e inestabilidad en los perfiles de voltaje [5].

Es por ese motivo que en los últimos años se han realizado varios estudios con respecto a la planeación de redes de distribución, desarrollándose así diferentes modelos matemáticos y algoritmos

inteligentes que permitan solucionar problemas de optimización y dimensionamiento en los cuales exista limitaciones o restricciones. Entre estos destacan los algoritmos de teoría de grafos, genéticos, técnicas metaheurísticas, optimización del enjambre de partículas, colonia de hormigas, MST, entre otros [6].

En este caso, el algoritmo que se aplica para el desarrollo del trabajo es el denominado Algoritmo de Polinización de Flores (APF).

Se escoge este algoritmo sobre los otros debido a que según estudios realizados por su autor Xin-She Yang, puede resolver problemas relacionados con optimización de manera más eficiente a comparación con otros métodos metaheurísticos mencionados anteriormente, como la optimización del enjambre de partículas y el algoritmo genético, obteniendo mejores resultados de salida, mayor rapidez de convergencia, características más estables y una mejor tasa de éxito [7].

El APF actuará sobre el flujo de potencia para determinar de manera óptima la ubicación y dimensionamiento de paneles fotovoltaicos, que harán la vez de generación distribuida en un sistema de distribución como se muestra en la Figura 1, con el objetivo de reducir las pérdidas de energía, mejorar los perfiles de voltaje y aumentar la confiabilidad en el sistema de distribución. Como caso de estudio para la aplicación del algoritmo propuesto, se utilizará el sistema de distribución IEEE de 34 barras. Para el desarrollo del flujo de potencia, implementación del algoritmo de optimización y dimensionamiento y descripción de resultados se utilizará Matlab. Los estudios de índices de confiabilidad serán comprobados mediante simulación en el software DIgSILENT Power Factory.



Figura 1: Generación distribuida en Sistemas Eléctricos de Distribución.

2 Marco Teórico

2.1 Sistemas Eléctricos de Distribución

Un sistema de distribución de energía es un conjunto de elementos los cuales permiten que un determinado número de cargas se alimenten de manera segura y confiable a un nivel de voltaje establecido, dichas cargas se encuentran en diferentes sitios [8].

Normalmente, los sistemas de distribución de energía se usan para diseñar, colocar y operar dispositivos de protección en la red de transmisión puesto que ayudan a disminuir o minimizar las pérdidas de energía al momento de elevar o bajar el voltaje. Este proceso conlleva un flujo de energía unidireccional desde la estación generadora de energía hasta el usuario final.

Se puede afirmar que la creación de estos sistemas de distribución representa uno de los mayores gastos para las compañías eléctricas puesto que deben asegurar un servicio óptimo y de calidad para todos sus clientes. El sistema de distribución clásico está compuesto por los siguientes elementos [9]:

- Sistema de subtransmisión
- Subestación de distribución
- Alimentador principal
- Transformador de distribución secundario
- Transformador de distribución de servicio

Los tres sistemas de distribución más utilizados para conducir la energía eléctrica hacia sus usuarios son el radial, anillo y mallado.

2.1.1 Sistema radial

El sistema radial es uno de los más sencillos que existen debido a que son alimentados únicamente por un extremo de este y conducen la energía de manera

radial hacia los consumidores [9]. Se podría decir que este sistema es de los más utilizados en la creación de sistemas de distribución. Su disposición y configuración básica se pueden observar en la Figura 2.

La ventaja de este sistema es el bajo costo de construcción y fácil equipación de protecciones. En cambio, su principal desventaja es al momento de existir alguna falla ya que dejaría sin suministro eléctrico a varios clientes hasta que la falla sea localizada y reparada.

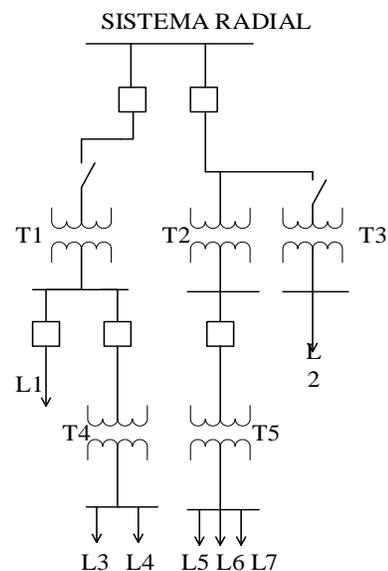


Figura 2: Sistema de distribución radial.

2.1.2 Sistema de anillo

Como se muestra en la Figura 3, el sistema de anillo o también llamado en bucle cerrado, es aquel cuyos puntos de alimentación o extremos de la red se encuentran en el mismo sitio y que al cerrarse forman un anillo [10].

La energía es entregada por ambos lados de la red y en el caso de existir alguna falla en esta, se puede aislar la zona afectada manteniendo así el servicio eléctrico. La desventaja de la red anillo es que al ser más compleja necesita un nivel de protección eléctrico superior.

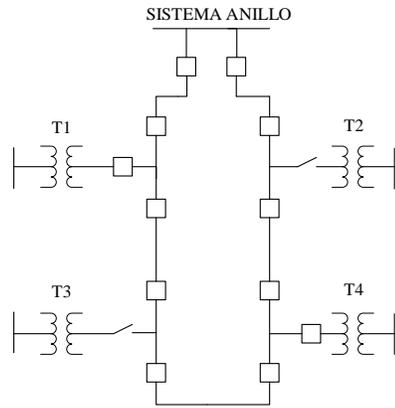


Figura 3: Sistema de distribución en anillo.

2.1.3 Sistema mallado

El sistema mallado es la más confiable que existe de los tres puesto que se conforma por varias redes en anillo unidas de forma radial [11], tal y como se muestra en la Figura 4. Esta red asegura un constante servicio eléctrico y facilidad de mantenimiento. La desventaja radica en el aumento drástico de cortocircuitos y el elevado costo de construcción.

Hoy en día, la construcción de sistemas de distribución busca generar un mínimo impacto ambiental aplicando el concepto de generación distribuida. El objetivo radica en implementar un modelo de ciudad que pueda ser autosostenible e impulsada por energía limpia [9].

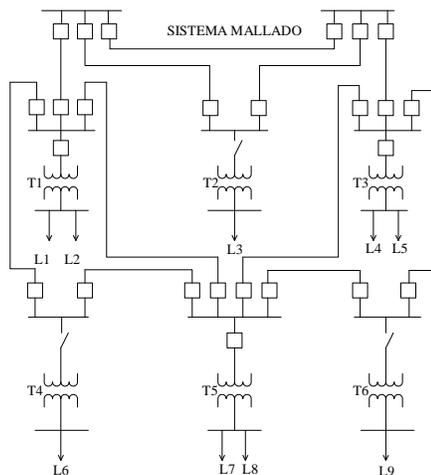


Figura 4: Sistema de distribución radial.

2.2 Energías renovables aplicadas en Generación Distribuida

La Generación Distribuida (GD) se ha convertido en una forma de generación eléctrica que complementa los sistemas de distribución actuales.

Al ser pequeñas unidades de generación las que se acoplan al sistema eléctrico, la potencia nominal que pueden generar estas no es muy elevada, pero sirven perfectamente para solventar la carga de la residencia en la cual se encuentra instalada o incluso para vender energía a la red en el momento de mayor demanda [12].

Normalmente, los generadores utilizados en GD aportan con potencias a la red que varían entre los kW hasta los MW, en cambio la generación habitual sobrepasa los 100 MW [12].

Para clasificar las tecnologías que se usan al momento de aplicar GD se han creado dos grupos; las convencionales y no convencionales [13]. Estas se pueden observar resumidas en la Tabla 1 y posteriormente se analizará la aplicada en este trabajo.

Tabla 1. Tecnologías aplicadas en GD.

Tecnologías no Convencionales	Tecnologías convencionales
Motor de combustión interna	Generación fotovoltaica
Turbinas de ciclo combinado	Generación eólica
Turbina de combustión	Geotérmica
Microturbinas	Microcentrales hidroeléctricas
	Biomasa
	Energía mareomotriz

2.2.1 Generación fotovoltaica

En este tipo de generación los paneles fotovoltaicos utilizan la energía

proveniente de la luz solar para convertirla en energía eléctrica mediante un inversor.

En cada celda ocurre el denominado efecto fotoeléctrico que se produce por la reacción de los materiales semiconductores de cada panel con la energía solar [14].

La ventaja de la generación fotovoltaica es que al tratarse de una energía renovable es inagotable y no produce efectos contaminantes para el medio ambiente, pero es muy difícil que se aplique en países con una economía por debajo del promedio ya que tanto su costo de instalación como de operación es muy alto [15].

2.3 Preparación de Sistemas de Distribución para Aplicación de Generación Distribuida

La Generación Distribuida (GD) es un concepto que trae consigo varios aspectos que las empresas de distribución deben tomar en cuenta si desean aplicarla. Estos aspectos pueden incluir la diversificación del sector, nuevos generadores que entran a la red en varios sitios y la calidad del servicio que puedan brindar [16].

Por ese motivo dichas empresas deben realizar investigaciones que incluyan pronósticos de demanda, estos tienen la función de planificar el comportamiento de la red y el crecimiento de la carga para evitar problemas futuros. Normalmente las planificaciones tienen una duración máxima de 10 años.

En general, el sistema de distribución mantiene una estabilidad constante en todo su sistema, pero también existen otros factores externos que pueden afectar el correcto funcionamiento de este, tales como lluvias torrenciosas y con granizo que pueden dañar los elementos de la red [17], así como también fauna silvestre que invada las subestaciones y provoque la salida de alguna línea de medio voltaje.

La aplicación de GD es una opción positiva para cualquier empresa distribuidora puesto que puede evitar todo tipo de fallas y a la vez minimizar la cantidad de usuarios afectados. Mientras más aumenta la carga también es necesario aumentar la capacidad del sistema eléctrico [18].

Esto significa más alimentadores, capacidad de subestaciones y líneas de transmisión y distribución. Es por esto que se debe realizar una buena planificación al momento de aplicar GD en los sistemas de distribución.

El impacto de la GD ha comenzado a sentirse en los últimos años debido a que varios países decidieron liberar sus mercados eléctricos e incentivar el desarrollo de tecnologías de generación eléctrica con la ayuda de nuevas políticas y reformas [19].

Uno de los aspectos positivos que ha ayudado a impulsar la aplicación de GD en la actualidad es su mínimo impacto negativo en el medio ambiente, esto debido al desarrollo tecnológico y los altos estándares de protección ambiental que se manejan hoy en día [20].

Así como existen aportes positivos de la GD también existen ciertas desventajas, ya que al implementar unidades de GD en un sistema de distribución pueden presentarse ciertos problemas con respecto a la calidad y estabilidad en la red debido a la intermitencia de dichas unidades [20].

A continuación, en la Tabla 2 se resumen las principales ventajas y desventajas de la GD en los sistemas eléctricos de potencia [21].

Tabla 2. Ventajas y desventajas de aplicar GD en sistemas eléctricos de potencia.

Ventajas	Desventajas
Mejora de calidad de la energía	Fluctuaciones de voltaje
Impacto ambiental negativo muy bajo y reducción de	Inversión inicial elevada

emisión de gases de efecto invernadero	
Suministra energía en periodos de gran demanda.	Intermitencia de sus unidades
Aumento de confiabilidad en el sistema	

2.4 Generación distribuida en sistemas eléctricos de distribución

En términos generales, se puede definir a la GD como energía eléctrica generada en la misma red de distribución. Se espera que con el paso de los años la GD tome fuerza en el mercado eléctrico a nivel mundial, debido a la cantidad de beneficios que se puede obtener de esta [22].

La incorporación de GD a las redes de distribución surge debido al considerable crecimiento de la demanda eléctrica en todo el mundo, esto produce que dichas redes deban ser repotenciadas aplicando nuevas tecnologías que puedan mejorar la calidad de la energía eléctrica [23].

2.4.1 Generación distribuida mediante paneles fotovoltaicos

La aplicación de paneles fotovoltaicos en GD es una de las más usadas a nivel mundial debido al desarrollo tecnológico que presentan. Los sistemas de distribución en los que se ha aplicado este tipo de tecnología han presentado beneficios operativos, técnicos y económicos.

Para la instalación de GD mediante paneles fotovoltaicos es necesario realizar un estudio sobre los recursos solares en existe en el sitio de instalación. El nivel de radiación solar es importante ya que este es aprovechado por las celdas solares en los paneles produciendo corriente eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico [14], [24].

Como se ha mencionado anteriormente la aplicación de GD mediante paneles fotovoltaicos trae un sin número de

beneficios para el sistema de distribución, así como también para el medio ambiente, pero hay muchos estudios en los cuales se destaca ciertos factores que pueden resultar limitantes al momento de instalar este tipo de GD [25]. Entre estos destacan:

- Elevación de voltajes en los nodos de la carga
- Fallas a tierra
- Aplicación de inversores
- Corrientes de fuga

Es de vital importancia la realización de un previo estudio en la red y todos los factores externos antes de realizar la instalación de paneles fotovoltaicos. Muchos de los factores limitantes pueden ser controlados o solventados si se toman las medidas necesarias.

2.5 Perfiles de voltaje

Normalmente, para generar, transmitir y distribuir energía eléctrica hasta el punto de consumo los sistemas de potencia deben manejar rangos operativos, estos permiten que el suministro entregado sea confiable y seguro [26].

Un sistema de potencia es estable cuando está en la capacidad de conservar un correcto y constante perfil de voltaje en todas sus barras, incluso después de haber sufrido alguna falla inesperada.

Frente a fallas inesperadas los niveles de voltaje se descontrolan, produciendo así, un desequilibrio entre energía generada y demandada [27].

Existen otros factores que pueden afectar la estabilidad de los perfiles de voltaje en sistemas eléctricos de potencia, estos pueden ser la capacidad de flujo de potencia reactiva por parte del generador, su límite de potencia reactiva y las características de carga [28].

Es aquí donde se encuentran las curvas PV y QV. La curva PV es la relación existente en la barra entre el voltaje y la potencia activa consumida por la carga. En

cambio, la curva QV se utiliza para el análisis nodal de QV y obtener la potencia reactiva [29].

Estas curvas se encuentran en los métodos estocásticos de análisis de estabilidad de voltaje, debido a que analiza las variables eléctricas de todo el sistema en base a los resultados obtenidos en múltiples estados de tiempo con el objetivo de determinar el estado condicional [30].

2.5.1 Límites de voltaje permitidos en sistemas de distribución

Al darse variaciones de voltaje en los sistemas de potencia a causa de fallas u otros factores, es necesario establecer rangos de operación en los cuales es permitido operar el sistema para asegurar que el servicio eléctrico sea de calidad [31].

En el caso de los sistemas eléctricos de potencia, el rango de voltaje establecido internacionalmente es de 0.95 p.u. a 1.05 p.u., en cambio, para los sistemas de distribución el rango de voltaje establecido es de 0.9 p.u. a 1.1 p.u.

Cada país posee una agencia reguladora que estable dichos rangos, para el Ecuador es la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARC). Esta dictamina según la Regulación No. 005/18 que, en un punto cualquiera del sistema de distribución, la calidad de nivel de voltaje se determinará mediante el siguiente índice [32]:

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_n}{V_n} \quad (1)$$

Donde:

ΔV_k Variación de voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en el punto k.

V_k Voltaje de suministro en el punto k.
 θ Voltaje nominal en el punto k.

Los límites para los índices de nivel de voltaje son los que se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3. Límites para índices de voltaje.

Nivel de Voltaje	Rango admisible
Bajo Voltaje	$\pm 8 \%$
Medio Voltaje	$\pm 6 \%$
Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5 \%$

2.6 Pérdidas de energía en los sistemas de distribución

El principal factor para que se generen las pérdidas de energía en el sistema de distribución está relacionado con el efecto Joule. Este fenómeno se da debido a la transformación de energía eléctrica en calor que se produce en el momento que la energía eléctrica es transportada por medio de los conductores [33].

La ecuación que representa este fenómeno es la siguiente:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n I_i^2 * R_i \quad (2)$$

Donde:

n Número de nodos del sistema.
 I_i Valor en el nodo i
 R_i Resistencia en el nodo i

En sistemas de distribución la mayoría de las cargas son de tipo inductivo, esto debido a que las distancias entre nodos son relativamente cortas y se trabaja a niveles de medio voltaje.

Es por ese motivo que la carga en los transformadores de distribución necesita energía reactiva, ya que al consumir este

tipo de energía se genera corriente inductiva y no produce ningún tipo de trabajo útil [34]. En sistemas trifásicos la potencia reactiva para un nodo está dada por la siguiente ecuación:

$$Q_i = \sqrt{3} * V_i * I_i * \sin \theta \quad (3)$$

Donde:

- V_i Voltaje en el nodo i.
- I_i Corriente en el nodo i.
- θ Ángulo entre el voltaje y corriente en el nodo i.

En general, las pérdidas de energía es un problema que representa altos costos para las empresas distribuidoras, lo que afecta de manera directa al precio de la electricidad [35].

2.7 Índices de confiabilidad en sistemas de distribución

Los índices de confiabilidad son herramientas que permiten conocer y valorar el estado de un sistema de potencia durante y posterior a una falla, reflejan si el mismo puede seguir operando de manera óptima manteniendo criterios de estabilidad [36].

En sistemas de distribución los índices de confiabilidad son de gran importancia ya que se considera a esta etapa del SEP como una zona de alta investigación, puesto que, según estudios, arriba del 90 % del total de eventos de salida suceden en esta parte del sistema. Sobre todo, se procura que los usuarios en general gocen de un servicio eléctrico de calidad ya que hoy en día la mayoría de las actividades que se realizan dependen de que el suministro eléctrico sea continuo y estable [37].

Existen varios tipos de índices que se pueden aplicar en los sistemas de distribución, entre ellos se encuentran los índices operativos los cuales están dados

en base a la potencia instalada en el sistema., los índices por potencias y por usuarios y finalmente, los índices enfocados hacia los usuarios finales.

En este caso los índices que se han aplicado para el desarrollo de este trabajo son los enfocados hacia los usuarios finales, ya que se basan en el estudio de frecuencia y duración de interrupción experimentados en un punto de carga. Es por ese motivo que dichos índices también son conocidos como índices de punto de carga y se detallan a continuación [36]:

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index): Este índice refleja el promedio entre el número total de interrupciones continuas en los clientes sobre el número total de clientes atendidos.
- SAIDI (System Average Interruption Duration Index): Este índice refleja la permanencia de una interrupción, se obtiene del promedio entre la suma de la duración de las interrupciones sobre el número total de clientes.
- CAIFI (Customer Average Interruption Frequency Index): Este índice refleja la cronología del sistema analizado, se obtiene del promedio entre el número total de interrupciones al cliente sobre el número total de clientes afectados.
- CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index): Este índice refleja las interrupciones que afectaron directamente a los clientes, se obtiene del promedio entre la suma de la duración de las interrupciones al cliente sobre número total de interrupciones de este.
- ASAI (Average Service Availability Service) y ASUI

(Average Service Unavailability Service): Estos índices reflejan la capacidad que posee el sistema de distribución para abastecer de energía eléctrica a sus usuarios de manera satisfactoria. Se obtiene del promedio entre el horario de servicio disponible para el cliente sobre las horas exigidas por el cliente.

- ENS (Energy Not Supplied): Este índice refleja la suma total de la energía no suministrada por el sistema
- AENS (Average Energy Not Supplied): Este índice refleja la media de energía no suministrada, se da del promedio entre la energía no suministrada sobre el número total de clientes guardados.

3 Algoritmo de Polinización de Flores

El Algoritmo de Polinización de Flores (APF) o Flower Pollination Algorithm (FPA) por sus siglas en inglés, se inspira en el proceso natural de polinización. El objetivo principal de una flor es básicamente ser capaz de reproducirse mediante polinización. Esta puede ser autopolinización (polinización local) y polinización cruzada (polinización global) [38]. Para la polinización global se presenta la siguiente ecuación [7]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L(x_i^t - g^*) \quad (4)$$

Donde:

- x_i^t Solución vectorial i en la iteración t .
- g^* Mejor solución de todas las soluciones en la última iteración.
- L Distancia de polinización o tamaño de paso.

Los insectos al desempeñar su papel de polinizadores permiten recorrer grandes distancias con varios tamaños de paso, dicha acción puede ser descrita con la distribución de Levy en la cual $L > 0$. La función de distancia de polinización de flores es presentada en la siguiente ecuación [7]:

$$L = Z \frac{R \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1 + \beta}{2}\right) \beta \frac{\beta - 1}{2}} \right)}{|R|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (5)$$

Donde:

- $\Gamma(\lambda)$ Función de gamma estándar.
- R Número aleatorio normal.
- β Es un factor de bloqueo, en este caso es 1.5.
- Z Constante de paso de Levy, es este caso es 0.01.

En la polinización local interviene la siguiente ecuación [7]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon (x_j^t - x_k^t) \quad (6)$$

Donde:

- x_j^t y x_k^t Posibles soluciones en un limitado grupo de barras.

El propósito del APF consta en la supervivencia del más apto y la óptima reproducción entre los miembros más fuertes. Es básicamente una tarea de optimización en la naturaleza. Además, el APF es capaz de resolver varios problemas en lo que a sistemas de energía respecta.

Es por dichos motivos que su uso es muy bien aceptado en problemas relacionados con dimensionamiento y ubicación, en este caso, generación distribuida [39].

4 Ubicación y dimensionamiento

Las pérdidas de potencia activa en el sistema se pueden calcular aplicando la siguiente ecuación:

$$L_i = R_i I_{ii}^2 \quad i=1, \dots, N \quad (7)$$

Donde:

- L_i Valor de las pérdidas en la línea i .
- R_i Valore de resistencia en la línea i .
- I_{ii} Corriente a través de la línea i .
- N Valores de las pérdidas calculados en cada línea.
- i Es un índice para las líneas que valen 1.

La determinación de la ubicación y la capacidad de generación distribuida en el sistema se obtendrá a partir del valor de las pérdidas de potencia activa. La función objetiva y restricciones se detallan a continuación:

$$f(x) = \min \left(\sum_{i=1}^N P_{Li} \right) \quad (8)$$

Donde:

- P_L Son las pérdidas de potencia activa.

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij} (Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (9)$$

Donde:

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (10)$$

$$\beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (11)$$

$V_i < \theta_i$	Es un voltaje complejo en la barra i .
$r_{ij} + jx_{ij} = Z_{ij}$	Son los elementos ij de la matriz de impedacia Z
P_i y P_j	Inyección de potencia activa ij en cada barra.
Q_i y Q_j	Inyección de potencia reactiva ij en cada barra.
N	Número de barra.

La ecuación que representa la inyección de potencia activa y reactiva en las barras i que poseen generación distribuida es la siguiente:

$$\sum P_G = P_D + P_L - P_{DG} \quad (12)$$

$$P_i = P_{DGi} - P_{Di} \quad (13)$$

$$Q_i = Q_{DGi} - Q_{Di} \quad (14)$$

La ubicación y capacidad de la generación distribuida será la correcta cuando en cada barra del sistema se cumpla con los perfiles de voltaje establecidos y la capacidad de potencia activa y reactiva esté dentro del límite de disponibilidad de la generación distribuida. Las ecuaciones que representan dichas restricciones son las siguientes:

$$V_{min} < V_{bus} < V_{max} \quad (15)$$

$$P_{min} < P_{GD} < P_{max} \quad (16)$$

$$Q_{min} < Q_{GD} < Q_{max} \quad (17)$$

Mediante un bloque de diagramas en la Figura 5, se muestra el funcionamiento de todo el programa aplicando el APF.

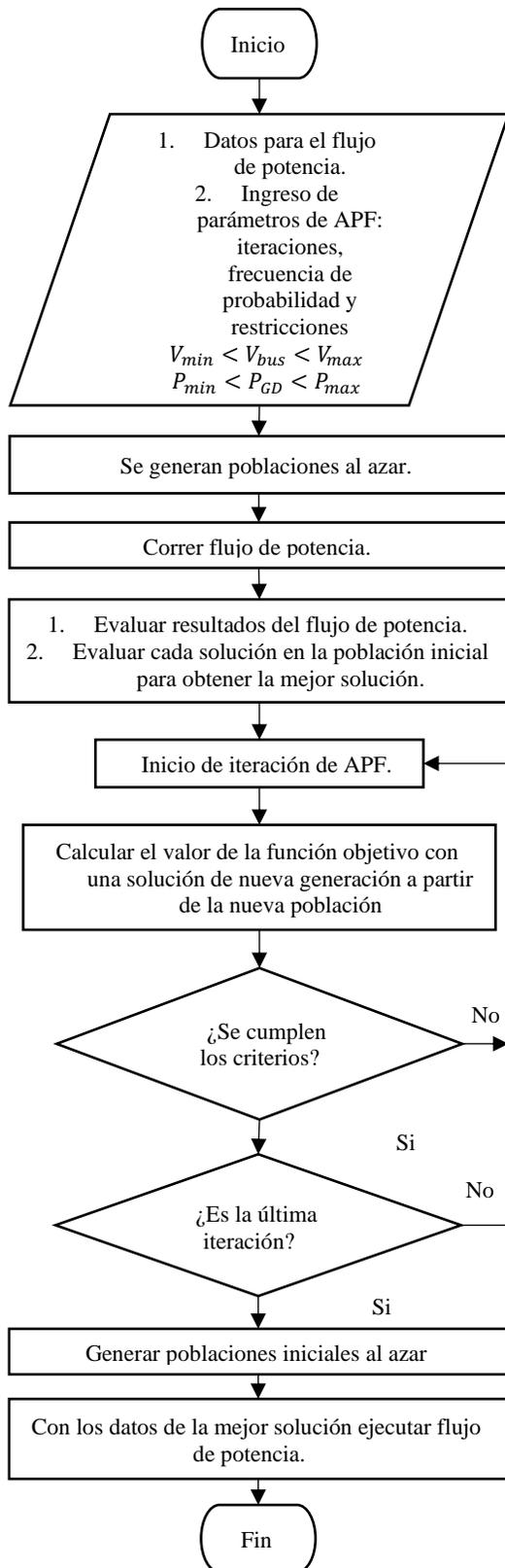


Figura 5. Diagrama de bloques para determinar la ubicación y capacidad de GD usando APF.

5 Implementación del modelo matemático

Para resolver el problema de optimización y dimensionamiento se utilizará el software Matlab. El primer paso requiere de los datos iniciales del sistema de distribución: generadores, líneas de transmisión y cargas. Posteriormente determinar los parámetros del APF. Finalmente, se determinan las restricciones que necesitará el algoritmo para dar la óptima solución al problema. El algoritmo de resolución para el modelo planteado se presenta en la Tabla 4.

Mediante los resultados obtenidos de la simulación, se realizará la determinación de los índices de confiabilidad utilizando el software DIGSILENT Power Factory.

Tabla 4. Pseudocódigo del algoritmo propuesto.

Algoritmo de solución	
Paso 1:	Ingreso de datos del sistema eléctrico
Paso 2:	Ingreso de parámetros del APF
Paso 3:	Ingreso de restricciones $V_{min} < V_{bus} < V_{max}$ $P_{min} < P_{GD} < P_{max}$ $Q_{min} < Q_{GD} < Q_{max}$
Paso 4:	Generación de poblaciones al azar
Paso 5:	Ejecutar flujo potencia
Paso 6:	Inicio de iteraciones APF polinización global $x_i^{t+1} = x_i^t + L(x_i^t - g^*)$
Paso 7:	Minimización de función objetivo $f(x) = \min \left(\sum_{i=1}^N P_{Li} \right)$
Paso 8:	Validación de datos
Paso 9:	Se comparan todas las soluciones posibles y se selecciona la que tiene el mejor valor de función objetivo
Paso 10:	Ejecutar flujo de potencia con resultados del mejor valor de función objetivo

6 Caso de estudio

Para la comprobación del algoritmo antes mencionado se usará un sistema de distribución IEEE de 34 barras el cual se puede observar en la Figura 6 y cuyas características se describen en las Tablas 5 y 6. El objetivo es aplicar generación distribuida en dicho sistema para posteriormente comparar resultados de pérdidas de potencia, perfiles de voltaje e índices de confiabilidad con respecto a antes de aplicar dicha generación y mediante estos resultados verificar que tanto mejora el sistema.

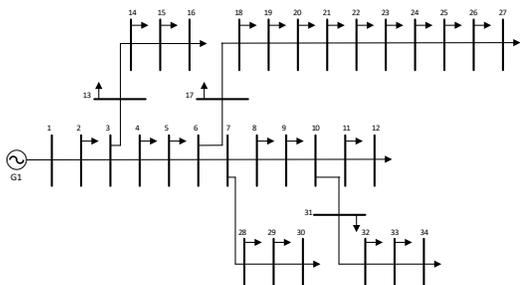


Figura 6. Diagrama unifilar del Modelo IEEE de 34 barras.

Tabla 5. Datos de las líneas.

Barra A	Barra B	R (p.u.)	X (p.u.)	Y/2 (p.u)
1	2	0.117	0.048	-
2	3	0.10725	0.044	-
3	4	0.16445	0.04565	-
4	5	0.1495	0.0415	-
5	6	0.1495	0.0415	-
6	7	0.3144	0.054	-
7	8	0.2096	0.036	-
8	9	0.3144	0.054	-
9	10	0.2096	0.036	-
10	11	0.131	0.0225	-
11	12	0.1048	0.018	-
3	13	0.1572	0.027	-
13	14	0.2096	0.036	-

14	15	0.1048	0.018	-
15	16	0.0524	0.009	-
6	17	0.1794	0.0498	-
17	18	0.16445	0.04565	-
18	19	0.2079	0.0473	-
19	20	0.189	0.043	-
20	21	0.189	0.043	-
21	22	0.262	0.045	-
22	23	0.262	0.045	-
23	24	0.3144	0.054	-
24	25	0.2096	0.036	-
25	26	0.131	0.0225	-
26	27	0.1048	0.018	-
7	28	0.1572	0.027	-
28	29	0.1572	0.027	-
29	30	0.1572	0.027	-
10	31	0.1572	0.027	-
31	32	0.2096	0.036	-
32	33	0.1572	0.027	-
33	34	0.1048	0.018	-

Tabla 6. Datos de las cargas.

Barra	PD (MW)	QD (MVar)
2	142.5	230
3	-	-
4	142.5	230
5	142.5	230
6	-	-
7	-	-
8	142.5	230
9	142.5	230
10	-	-
11	142.5	230
12	84	137
13	45	72
14	45	72
15	45	72
16	7.5	13.5
17	142.5	230

18	142.5	230
19	142.5	230
20	142.5	230
21	142.5	230
22	142.5	230
23	142.5	230
24	142.5	230
25	142.5	230
26	142.5	230
27	85	137
28	48	75
29	48	75
30	48	75
31	34.5	57
32	34.5	57
33	34.5	57
34	34.5	57

7 Análisis de Resultados

En este caso, posterior a la resolución del modelo matemático en Matlab y debido a las características propias del sistema estudiado, se ha dictaminado que la óptima ubicación para la GD sería en la barra 28 tal y como se muestra en la Figura 7.

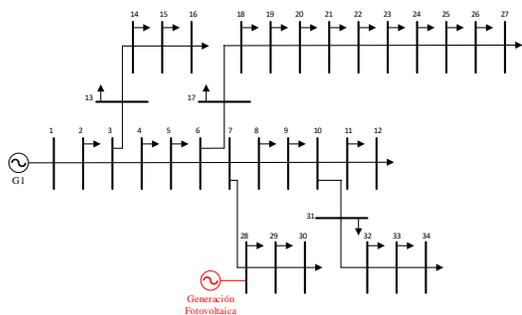


Figura 7. Diagrama unifilar del Modelo IEEE de 34 con óptima ubicación de GD.

Con respecto al dimensionamiento de la GD, se ha basado la variable aleatoria en un rango de entre 0 a 5 MW.

7.1 Perfiles de voltaje

En la Figura 8 se observa los perfiles de voltaje antes de la aplicación de GD. Por

las características propias del sistema se puede apreciar que los niveles de voltaje en ciertas barras llegan hasta valores de 0.95 p.u. lo cual está dentro de los valores permitidos pero muy cerca de los límites de operación, por ende, se busca elevarlos a valores más cercanos al 1 p.u.

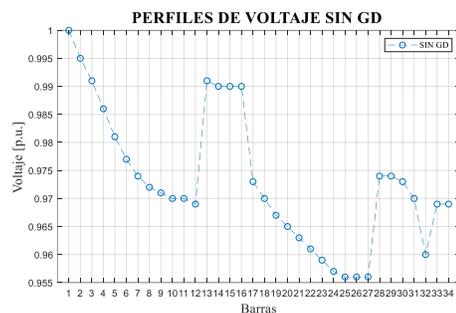


Figura 8. Perfiles de voltaje antes de aplicar GD.

En la Figura 9 se observa los perfiles de voltaje con la aplicación de GD. Como se puede apreciar los resultados muestran un aumento en los perfiles de voltaje en la mayoría de las barras con respecto a la Figura 8 donde no se aplicaba GD.

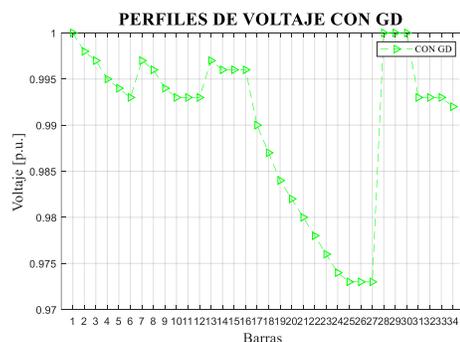


Figura 9. Perfiles de voltaje después de aplicar GD.

Finalmente, en la Tabla 7 y Figura 10 se puede apreciar la comparación de perfiles de voltaje antes y después de aplicar GD en el sistema. Los resultados obtenidos reflejan una clara mejora en los perfiles de voltaje de la mayoría de las barras, en donde se pudo elevar los perfiles de voltaje más bajos del sistema que eran de 0.956 p.u. a 0.973 p.u. y en otros casos, elevar los perfiles de voltaje de las barras hasta el 1

p.u. Estos valores confirman que los resultados obtenidos por el APF son correctos.

Tabla 7. Comparación de perfiles de voltaje antes y después de aplicar GD.

Barra	Sin GD (p.u.)	Con GD (p.u.)
1	1	1
2	0.995	0.998
3	0.991	0.997
4	0.986	0.995
5	0.981	0.994
6	0.977	0.993
7	0.974	0.997
8	0.972	0.996
9	0.971	0.994
10	0.970	0.993
11	0.970	0.993
12	0.969	0.993
13	0.991	0.997
14	0.990	0.996
15	0.990	0.996
16	0.990	0.996
17	0.973	0.990
18	0.970	0.987
19	0.967	0.984
20	0.965	0.982
21	0.963	0.980
22	0.961	0.978
23	0.959	0.976
24	0.957	0.974
25	0.956	0.973
26	0.956	0.973
27	0.956	0.973
28	0.974	1
29	0.974	1
30	0.973	1
31	0.970	0.993
32	0.969	0.993
33	0.969	0.993

34	0.969	0.992
----	-------	-------

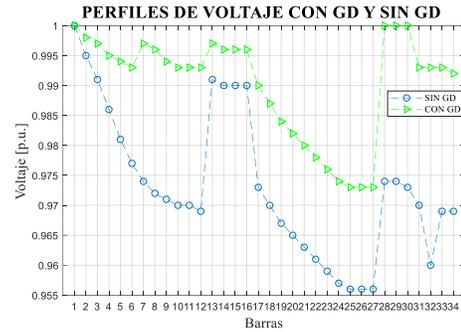


Figura 10. Comparación de perfiles de voltaje antes y después de aplicar GD.

7.2 Pérdidas de potencia

En la Figura 11 se observa la comparación total de pérdidas en el sistema, antes y después de la aplicación de GD. Por los datos obtenidos se vuelve a ratificar la eficacia del modelo matemático aplicado, ya que reduce las pérdidas del sistema en más del 50%, pasando de un 0.217 MW de potencia activa perdida a tan solo un 0.1 MW.

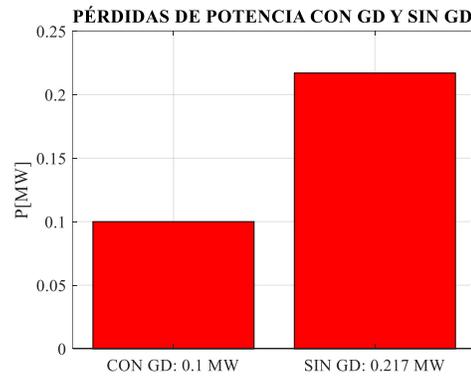


Figura 11. Comparación de pérdidas de potencia antes y después de aplicar GD.

7.3 Índices de confiabilidad

Debido a que se analizarán los resultados de 7 diferentes índices de confiabilidad y cada uno de ellos posee su propia unidad de medida, se ha colocado la Tabla 8 con el fin de evitar confusiones al momento de leer los resultados obtenidos.

Tabla 8. Unidades de medida de los índices de confiabilidad.

Índice	Unidades
SAIFI	[Interrupciones/año-cliente]
CAIFI	[Interrupciones/año-cliente]
SAIDI	[h/año-cliente]
CAIDI	[h/interrupción-cliente]
ASAI	[Disponibilidad de servicio]
ENS	[MWh/año]
AENS	[MWh/usuario]

En la Tabla 9 se observan los índices de confiabilidad del sistema estudiado antes de la aplicación de GD. Los datos revelan que al cabo de un año cada usuario sufrirá 5.58 interrupciones del sistema eléctrico, cada una de estas con una duración aproximada de 3.37 horas sumando un total de 18.62 horas al año. Esto significa que en un caso hipotético la empresa proveedora no pudo cobrar 53.504 MWh. A pesar de esto el sistema posee una disponibilidad del servicio de 99.787%.

Tabla 9. Índices de confiabilidad del sistema sin GD.

Índice	Sin GD
SAIFI	5.5800
CAIFI	5.5800
SAIDI	18.62
CAIDI	3.337
ASAI	0.9978744292
ENS	53.504
AENS	0.089

En la Tabla 10 se observan los índices de confiabilidad del sistema estudiado posterior a la aplicación de GD. Los datos revelan que al cabo de un año cada usuario

sufrirá 3.87 interrupciones del sistema eléctrico, cada una de estas con una duración aproximada de 3.358 horas sumando un total de 13.003 horas al año. Esto significa que en un caso hipotético la empresa proveedora no pudo cobrar 37.289 MWh. A pesar de esto el sistema posee una disponibilidad del servicio de 99.851%.

Tabla 10. Índices de confiabilidad del sistema con GD.

Índice	Con GD
SAIFI	3.872259
CAIFI	3.872259
SAIDI	13.003
CAIDI	3.358
ASAI	0.9985156404
ENS	37.289
AENS	0.062

En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos de los índices de confiabilidad antes y después de la aplicación de GD.

Como se puede observar los datos confirman que la inserción de GD en el sistema provoca cambios positivos en todos los índices analizados, esto significa que el sistema se vuelve mucho más confiable mejorando así la calidad del servicio brindado a los usuarios.

Tabla 11. Índices de confiabilidad del sistema antes y después de aplicar GD.

Índice	Sin GD	Con GD
SAIFI	5.5800	3.872259
CAIFI	5.5800	3.872259
SAIDI	18.62	13.003
CAIDI	3.337	3.358
ASAI	0.9978744292	0.9985156404

ENS	53.504	37.289
AENS	0.089	0.062

6. Conclusiones

Posterior al desarrollo de este trabajo y al análisis de los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

La aplicación de GD se presenta como alternativa para satisfacer las necesidades tanto de los sistemas de distribución, así como también de los de transmisión debido que aparte de reducir las pérdidas en el sistema permite reducir costos relacionados con la generación y transmisión de energía, sin mencionar la cantidad de beneficios que aporta al ser amigable con el medio ambiente.

La aplicación del APF ha cumplido con los objetivos planteados al inicio del trabajo, ya que gracias a la óptima ubicación y dimensionamiento de la GD las pérdidas de potencia del sistema se redujeron en más del 50%, y los perfiles de tensión a pesar de ya haberse encontrado dentro de los rangos permisibles de operación se elevaron aún más, llegando en algunas barras al 1 p.u.

Después de obtener los resultados de la óptima ubicación y dimensionamiento de GD, se pudo verificar y comparar la mejora en los índices de confiabilidad del sistema. Los resultados demostraron que aplicar una unidad de GD con las características dadas por el APF permite reducir las interrupciones de energía y las horas que el usuario pasa sin este servicio en un 30% haciendo más confiable al sistema y permitiendo que la tasa de disponibilidad del suministro eléctrico para todos los usuarios en general mejore.

7. Trabajos Futuros

Los estudios y resultados obtenidos en el presente trabajo pueden ser la base para realizar investigaciones relacionadas con:

- Óptima ubicación y dimensionamiento de múltiples unidades de GD con inyección de potencia reactiva.
- Óptima ubicación y dimensionamiento de GD basado en diferentes escenarios de demanda.

8. Referencias

- [1] D. Carrión and L. Ortiz, "Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos," *Ingenius*, no. 10, pp. 44–48, 2013, doi: 10.17163/ings.n10.2013.05.
- [2] H. Liao, C. Xu, J. Song, and Y. Yu, "Green power generation technology for distributed power supply," *2008 China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED 2008*, no. 4, 2008, doi: 10.1109/CICED.2008.5211704.
- [3] S. A. Hosseini, S. H. H. Sadeghi, A. Askarian-Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, and A. Nasiri, "Optimal placement and sizing of distributed generation sources considering network parameters and protection issues," *3rd Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2014*, pp. 922–926, 2014, doi: 10.1109/ICRERA.2014.7016521.
- [4] P. V. Babu and R. Dahiya, "Direct search approach for multiple distributed generator allocation in radial distribution systems," *Proc. 6th IEEE Power India Int. Conf. PIICON 2014*, vol. 3, 2014, doi: 10.1109/34084POWERI.2014.7117686.
- [5] D. B. Prakash and C. Lakshminarayana, "Multiple DG Placements in Distribution

- System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm,” *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 785–792, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.173.
- [6] A. Swarnkar, N. Gupta, and K. R. Niazi, “Efficient reconfiguration of distribution systems using ant colony optimization adapted by graph theory,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2011, doi: 10.1109/PES.2011.6039006.
- [7] T. Prasetyo, Sarjiya, and L. M. Putranto, “Optimal sizing and siting of PV-based distributed generation for losses minimization of distribution using flower pollination algorithm,” *2019 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. ICOIACT 2019*, no. 1, pp. 779–783, 2019, doi: 10.1109/ICOIACT46704.2019.8938424.
- [8] R. Rajaram, K. Sathish Kumar, and N. Rajasekar, “Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG),” *Energy Reports*, vol. 1, pp. 116–122, 2015, doi: 10.1016/j.egyr.2015.03.002.
- [9] J. D. Vargas and G. Ramos, “Fault locator implementation for radial distribution systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 12, no. 8, pp. 1473–1478, 2014, doi: 10.1109/TLA.2014.7014516.
- [10] K. H. Youssef, “Optimal routing of ring power distribution systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 199, no. June, p. 107392, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107392.
- [11] A. M. Tsimtsios, G. N. Korres, and V. C. Nikolaidis, “A pilot-based distance protection scheme for meshed distribution systems with distributed generation,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 105, no. April 2018, pp. 454–469, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.022.
- [12] W. El-Khattam and M. M. A. Salama, “Distributed generation technologies, definitions and benefits,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 71, no. 2, pp. 119–128, 2004, doi: 10.1016/j.epsr.2004.01.006.
- [13] L. I. Dulău, M. Abrudean, and D. Bică, “Distributed Generation Technologies and Optimization,” *Procedia Technol.*, vol. 12, pp. 687–692, 2014, doi: 10.1016/j.protcy.2013.12.550.
- [14] I. E. Pereda Soto, “Celdas Fotovoltaicas En Generacion Distribuida,” *Pontif. Univ. Catol. Chile*, p. 173, 2005.
- [15] J. Feng and S. X. Xu, “Integrated technical paradigm based novel approach towards photovoltaic power generation technology,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 34, p. 100613, 2021, doi: 10.1016/j.esr.2020.100613.
- [16] H. Y. Li, S. Y. Ge, and H. Liu, “Analysis of the effect of distributed generation on power grid,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, pp. 1–5, 2012, doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307248.
- [17] J. Vasco and A. Aguila, “Design of Automatic Reclosing scheme in distribution feeders,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2587–2593, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7014516.

- 10.1109/TLA.2015.7332136.
- [18] W. El-Khattam, Y. Hegazy, and M. Salama, "An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning," *2005 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 3, no. 2, p. 2392, 2005, doi: 10.1109/pes.2005.1489232.
- [19] C. Duque, E. F. Marmolejo, and M. T. R. de Torres, "Análisis de perspectiva de la generación distribuida en el sector eléctrico colombiano." 2012, [Online]. Available: <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/Rev19-9.pdf>.
- [20] O. D. Montoya Giraldo, A. Grajales, L. F. Grisales, and C. A. Castro, "Ubicación y operación eficiente de almacenadores de energía en micro-redes en presencia de generación distribuida," *Rev. CINTEX*, vol. 22, no. 1, pp. 97–117, 2017, doi: 10.33131/24222208.290.
- [21] E. J. Coster, J. M. A. Myrzik, B. Kruimer, and W. L. Kling, "Integration issues of distributed generation in distribution grids," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 28–39, 2011, doi: 10.1109/JPROC.2010.2052776.
- [22] M. Kumar, A. Kumar, and K. S. Sandhu, "Impact of distributed generation on nodal prices in hybrid electricity market," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 830–840, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.154.
- [23] M. M. Shi, B. Zhou, and J. D. Wei, "Simulation research on a novel distributed generation system," *2011 4th Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl. PESA 2011*, 2011, doi: 10.1109/PESA.2011.5982941.
- [24] F. Katiraei and J. R. Agüero, "Solar PV integration challenges," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 62–71, 2011, doi: 10.1109/MPE.2011.940579.
- [25] R. A. Shayani, S. Member, M. Aurélio, G. De Oliveira, and S. Member, "Photovoltaic Generation Penetration Limits in Radial Distribution Systems Rafael," vol. 26, no. 3, pp. 1625–1631, 2011.
- [26] F. A. Castillo Muñoz, A. Aguila Tellez, and J. W. Gonzalez Sanchez, "Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7795819.
- [27] N. Mourad and B. Mohamed, "Impact of increased distributed photovoltaic generation on radial distribution networks," *Int. Conf. Control. Decis. Inf. Technol. CoDIT 2016*, pp. 292–295, 2016, doi: 10.1109/CoDIT.2016.7593576.
- [28] V. V. S. N. Murty and A. Kumar, "Optimal placement of DG in radial distribution systems based on new voltage stability index under load growth," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 69, pp. 246–256, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.080.
- [29] S. Sultana and P. K. Roy, "Krill herd algorithm for optimal location of distributed generator in radial distribution system," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 40, pp. 391–404, 2016, doi: 10.1016/j.asoc.2015.11.036.
- [30] V. Vita, T. Alimardan, and L.

- Ekonomou, “The impact of distributed generation in the distribution networks’ voltage profile and energy losses,” *Proc. - EMS 2015 UKSim-AMSS 9th IEEE Eur. Model. Symp. Comput. Model. Simul.*, pp. 260–265, 2016, doi: 10.1109/EMS.2015.46.
- [31] Z. W. Khan and S. Khan, “Analyzing the impacts of Distributed Generation on power losses and voltage profile,” *Proc. 2015 Int. Conf. Emerg. Technol. ICET 2015*, pp. 1–4, 2016, doi: 10.1109/ICET.2015.7389182.
- [32] ARCONEL, “Regulación No. ARCONEL 005/18: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica,” *Arconel*. p. 38, 2018.
- [33] A. A. Téllez, A. Robayo, G. López, L. Ortiz, I. Isaac, and J. González, “Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm,” *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conf. - Living Energy Transition, FISE/CIGRE 2019*, 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984965.
- [34] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. W. González, “Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review,” *Heliyon*, vol. 4, no. 8, 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00746.
- [35] D. Q. Hung and N. Mithulananthan, “Multiple distributed generator placement in primary distribution networks for loss reduction,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1700–1708, 2013, doi: 10.1109/TIE.2011.2112316.
- [36] R. Billinton and A. N. Ronald, *Reliability Evaluation of Power Systems*, vol. 26, no. 5. 1996.
- [37] J. Z. Carlos, L. C. Piñeros, and D. A. Castaño, “El metodo de simulación de Montecarlo en estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica,” no. 24, pp. 55–60, 2004.
- [38] X. S. Yang, M. Karamanoglu, and X. He, “Multi-objective flower algorithm for optimization,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 18, pp. 861–868, 2013, doi: 10.1016/j.procs.2013.05.251.
- [39] K. S. Pandya, D. A. Dabhi, and S. K. Joshi, “Comparative study of bat & flower pollination optimization algorithms in highly stressed large power system,” *2015 Clemson Univ. Power Syst. Conf. PSC 2015*, no. 1, 2015, doi: 10.1109/PSC.2015.7101677.

8.1 Matriz de Estado de Arte

Tabla 12. Matriz de estado del arte.

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES																							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA				
				Sistemas Eléctricos de Distribución	Generación Distribuida	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de Generación Distribuida	Perfiles de Voltaje	Pérdidas de Potencia	Índices de Confiabilidad	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Minimización de Pérdidas	Mejoramiento de índices de Confiabilidad	Ubicación de GD	Dimensionamiento de GD	Restricción de Niveles de Voltaje	Restricción del Balance de Potencia	Restricción de Capacidad de Generación	Algoritmo de Polinización de Flores	Minimización de Pérdidas y Variación de Perfiles de Voltaje	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de GD	Flujo Óptimo de Potencia	Aplicación de GD	Minimizar Pérdidas de Potencia
1	2013	Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos	24		☒						☒	☒					☒			☒			
2	2008	Green power generation technology for distributed power supply	31	☒	☒			☒						☒			☒			☒	☒		
3	2014	Optimal placement and sizing of distributed generation sources considering network parameters and protection issues	16	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒		☒		☒		☒		☒		☒	☒
4	2014	Direct search approach for multiple distributed generator allocation in radial distribution systems	3	☒	☒															☒			
5	2016	Multiple DG Placements in Distribution System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm	81	☒		☒		☒		☒	☒	☒		☒		☒		☒			☒	☒	☒
6	2011	Efficient reconfiguration of distribution systems using ant colony optimization adapted by graph theory	28	☒			☒							☒		☒		☒					
7	2019	Optimal sizing and siting of PV-based distributed generation for losses minimization of distribution using flower pollination algorithm	7	☒	☒	☒				☒						☒		☒		☒		☒	☒
8	2015	Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG)	194	☒		☒		☒								☒		☒			☒		

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENREACCIÓN DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA					
				Sistemas Eléctricos de Distribución	Generación Distribuida	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de Generación Distribuida	Perfiles de Voltaje	Pérdidas de Potencia	Índices de Confiabilidad	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Minimización de Pérdidas	Mejoramiento índices de Confiabilidad	Ubicación de GD	Dimensionamiento de GD	Restricción de Niveles de Voltaje	Restricción del Balance de Potencia	Restricción de Capacidad de Generación	Algoritmo de Polinización de Flores	Minimización de Pérdidas y Variación de Perfiles de Voltaje	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de GD	Flujo Óptimo de Potencia	Aplicación de GD	Minimizar Pérdidas de Potencia	Mejoramiento de Perfiles de Voltaje e Índices de Confiabilidad
9	2014	Fault locator implementation for radial distribution systems	6	✗			✗							✗				✗						
10	2021	Optimal routing of ring power distribution systems	0	✗		✗	✗		✗			✗	✗	✗		✗		✗	✗				✗	✗
11	2019	A pilot-based distance protection scheme for meshed distribution systems with distributed generation	25		✗			✗		✗					✗						✗	✗		
12	2004	Distributed generation technologies, definitions and benefits	1257		✗						✗	✗									✗			
13	2014	Distributed Generation Technologies and Optimization	37		✗		✗	✗				✗	✗			✗					✗			
14	2005	Celdas Fotovoltaicas En Generacion Distribuida	28		✗		✗		✗	✗				✗				✗			✗	✗	✗	
15	2021	Integrated technical paradigm based novel approach towards photovoltaic power generation technology	0		✗	✗		✗							✗						✗			
16	2012	Analysis of the effect of distributed generation on power grid	8	✗	✗	✗			✗												✗		✗	
17	2015	Design of Automatic Reclosing scheme in distribution feeders	20			✗	✗	✗				✗												✗
18	2005	An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning	664	✗	✗		✗		✗					✗				✗		✗	✗	✗	✗	
19	2012	Analisis de prospectiva de la generacion distribuida en el sector electrico colombiano	17	✗	✗			✗		✗					✗					✗	✗	✗		

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Sistemas Eléctricos de Distribución	Generación Distribuida	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de Generación Distribuida	Perfiles de Voltaje	Pérdidas de Potencia	Índices de Confiabilidad	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Minimización de Pérdidas	Mejoramiento índices de Confiabilidad	Ubicación de GD	Dimensionamiento de GD	Restricción de Niveles de Voltaje	Restricción del Balance de Potencia	Restricción de Capacidad de Generación	Algoritmo de Polinización de Flores	Minimización de Pérdidas y Variación de Perfiles de Voltaje	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de GD	Flujo Óptimo de Potencia	Aplicación de GD	Minimizar Pérdidas de Potencia
20	2017	Ubicación y operación eficiente de almacenadores de energía en micro-redes en presencia de generación distribuida	5		☒	☒	☒	☒				☒	☒		☒		☒	☒	☒				☒
21	2011	Integration issues of distributed generation in distribution grids	431	☒	☒		☒	☒		☒	☒			☒	☒				☒	☒	☒		
22	2018	Impact of distributed generation on nodal prices in hybrid electricity market	9		☒															☒			
23	2011	Simulation research on a novel distributed generation system	1	☒	☒	☒	☒	☒												☒			
24	2011	Solar PV integration challenges	556					☒		☒					☒						☒		
25	2011	Photovoltaic Generation Penetration Limits in Radial Distribution Systems Rafael	281	☒	☒		☒			☒				☒					☒			☒	
26	2016	Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation	45	☒	☒	☒															☒		
27	2016	Impact of increased distributed photovoltaic generation on radial distribution networks	14		☒			☒		☒	☒				☒						☒	☒	☒
28	2015	Optimal placement of DG in radial distribution systems based on new voltage stability index under load growth	234	☒		☒	☒			☒			☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒	☒
29	2016	Krill herd algorithm for optimal location of distributed generator in radial distribution system	119	☒	☒															☒			

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENREACCIÓN DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Sistemas Eléctricos de Distribución	Generación Distribuida	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de <small>Comunicaciones Distribuidas</small>	Pérfiles de Voltaje	Pérdidas de Potencia	Índices de Confiabilidad	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Minimización de Pérdidas	Mejoramiento Índices de Confiabilidad	Ubicación de GD	Dimensionamiento de GD	Restricción de Niveles de Voltaje	Restricción del Balance de Potencia	Restricción de Capacidad de Generación	Algoritmo de Polinización de Flores	Minimización de Pérdidas y Variación de Perfiles <small>de Voltaje</small>	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de GD	Flujo Óptimo de Potencia	Aplicación de GD	Minimizar Pérdidas de Potencia
30	2015	The impact of distributed generation in the distribution networks	78	☒		☒	☒	☒															
31	2015	Analyzing the impacts of Distributed Generation on power losses and voltage profile	26		☒	☒		☒			☒					☒				☒	☒	☒	
32	2018	Regulación No. ARCONEL 005/18: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica	0	☒																			
33	2019	Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm	17			☒	☒			☒			☒	☒	☒			☒				☒	☒
34	2018	Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review	49	☒	☒	☒				☒		☒	☒		☒				☒	☒	☒		☒
35	2013	Multiple distributed generator placement in primary distribution networks for loss reduction	754	☒		☒				☒								☒				☒	☒
36	1996	Reliability Evaluation of Power Systems	525							☒		☒										☒	
37	2004	El metodo de simulación de Montecarlo en estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica	27						☒			☒										☒	
38	2013	Multi-objective flower algorithm for optimization	366		☒		☒			☒					☒			☒	☒		☒		☒

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO EL ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES

ITEM	DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Sistemas Eléctricos de Distribución	Generación Distribuida	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de Generación Distribuida	Perfiles de Voltaje	Pérdidas de Potencia	Índices de Confiabilidad	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Minimización de Pérdidas	Mejoramiento índices de Confiabilidad	Ubicación de GD	Dimensionamiento de GD	Restricción de Niveles de Voltaje	Restricción del Balance de Potencia	Restricción de Capacidad de Generación	Algoritmo de Polinización de Flores	Minimización de Pérdidas y Variación de Perfiles de Voltaje	Óptima Ubicación y Dimensionamiento de GD	Flujo Óptimo de Potencia	Aplicación de GD	Minimizar Pérdidas de Potencia	Mejoramiento de Perfiles de Voltaje e Índices de Confiabilidad	Óptima ubicación y Dimensionamiento
39	2015	Comparative study of bat & flower pollination optimization algorithms in highly stressed large power system	11	✘													✘								
CANTIDAD:				23	24	17	16	16	2	14	11	2	13	12	11	10	10	2	14	10	9	24	11	16	10

8.2 Resumen de Indicadores

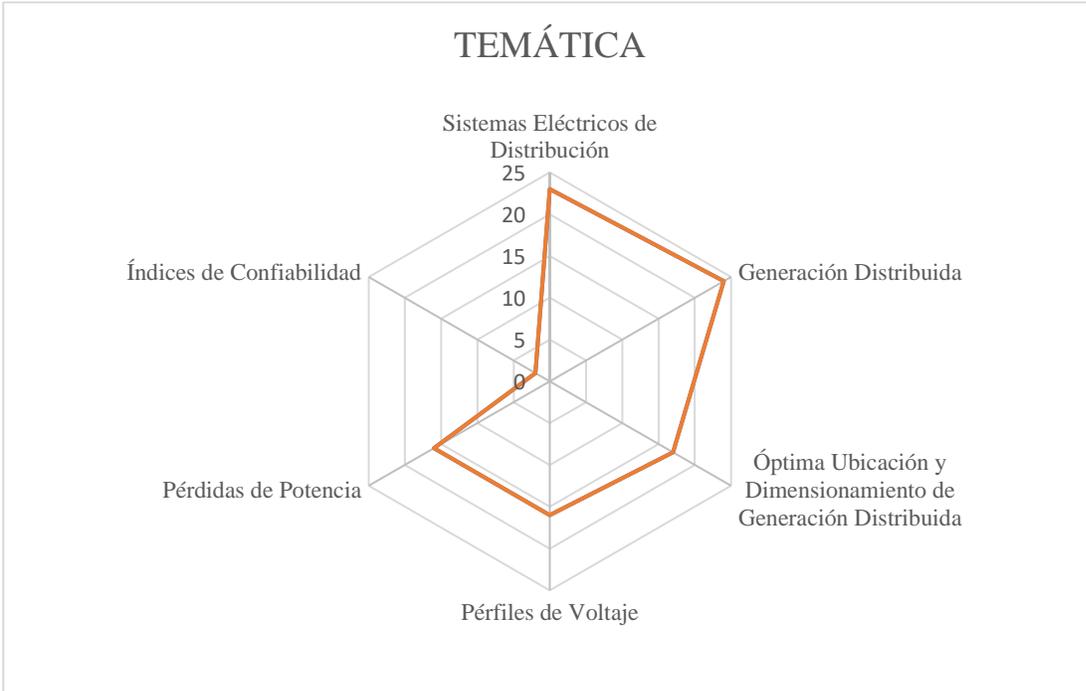


Figura 12. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

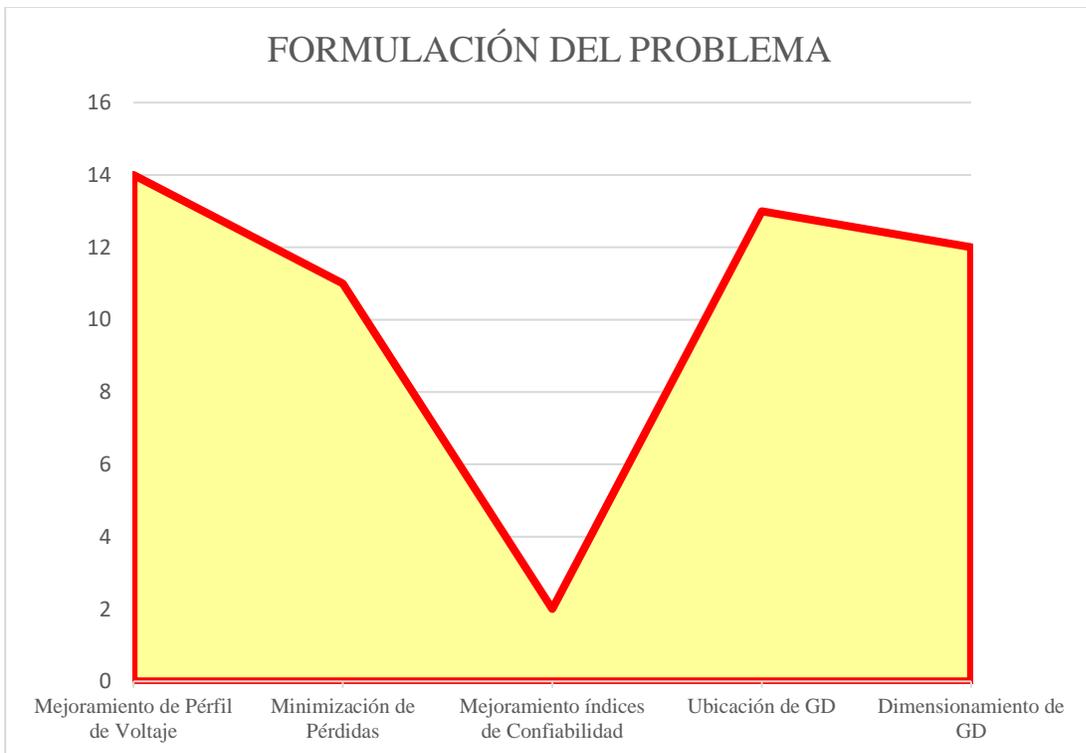


Figura 13. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

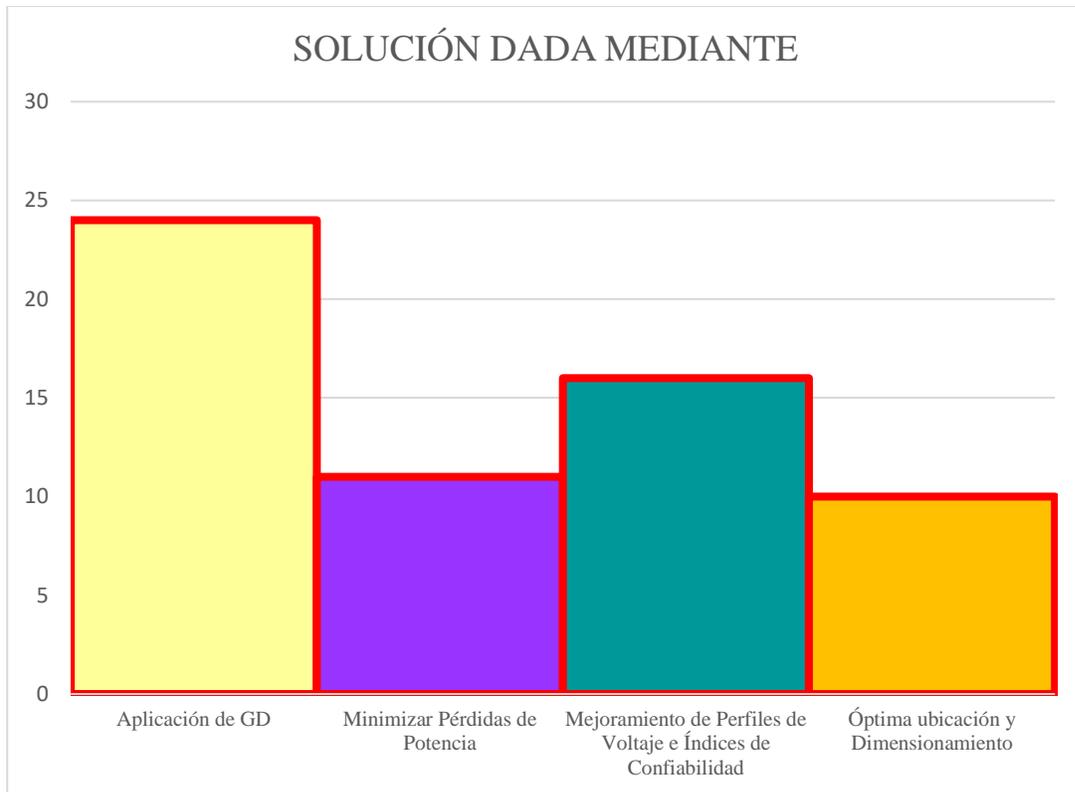


Figura 14. Indicador de solución - Estado del arte.